

дефектов. Этот уровень представляет собой тип локализованного состояния, в котором электроны ограничены определенной областью структуры.

#### Список литературы

1. Физическое материаловедение / Под ред. Б. А. Калина. – М.: МИФИ, 2007. – Т. 1. – 636 с.
2. Pei-Hsing Huang, Chi-Ming Lu. Effects of Vacancy Cluster Defects on Electrical and Thermodynamic Properties of Silicon Crystals [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/863404/>
3. И.И. Наркевич, Е.В. Фарафонтова, А.В. Магалинская. Численные расчеты вклада подсистемы вакансий в решеточную теплоемкость кристалла [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennye-raschety-vklada-podsistemy-vakansiy-v-reshetochnuyu-teploemkost-kristalla/viewer>

### РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЛЭМБА В АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ

А.А.КОНОНОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Томский политехнический университет

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [anastasiyakononova98@yandex.ru](mailto:anastasiyakononova98@yandex.ru)

В настоящее время существует потребность в своевременном, быстром и дешёвом способе обнаружения повреждений и прогнозирования оставшегося срока службы в режиме реального времени [1]. Одним из передовых направлений является встроенный мониторинг состояния (SHM) с использованием волн Лэмба [2, 3, 4].

Целью данной работы является разработка и экспериментальная верификация модели распространения волн Лэмба в алюминиевой пластине.

Объект исследования – пластина Д16АТ (500х500х3мм), смоделированная в программном комплексе ABAQUS/CAE с помощью метода конечных элементов (максимальный размер элемента – 1 мм). В качестве тестового сигнала использовалась 5-ти цикловая синусоида модулированная окном Хэннинга. Для генерации волн Лэмба на поверхности пластины в виде набора элементов были смоделированы 12 ультразвуковых преобразователя. Каждый датчик выступал в роли либо генератора, либо приёмника. В работе изучались три частоты генерации волн: 50, 100 и 200 кГц. В качестве дефекта была выбрана сквозная трещина шириной 1 мм и длиной 10,15,20,30 и 40 мм. Оценка наличия повреждения и его местоположения происходила путём сравнения базового (неповреждённое состояние) и повреждённого сигнала по изменению амплитуды (dA). Параметр dA для каждой пары «генератор-приёмник» рассчитывался по формуле:

$$-dA = \frac{dA_2 - dA_1}{dA_2}, \quad (1)$$

где  $dA_1$  и  $dA_2$  – изменение амплитуды первого и второго сигнала.

Индекс повреждения характеризует степень серьёзности повреждения и рассчитывается по формуле:

$$DI = \frac{\sum w_i}{n}, \quad (2)$$

где  $w_i$  - вес  $i$ -й точки пересечения,  $n$  – число точек пересечения.

В результате исследования были рассчитаны координаты центра повреждения, погрешность обнаружения и индекс повреждения для каждого случая.

Осреднённые результаты обнаружения трещины представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Осреднённые результаты обнаружения трещины

Длина трещины, мм	Локация по параметру dA	
	$\Delta$ , мм	DI
10	39,24	0,0026
15	47,93	0,0071
20	59,00	0,0098
30	54,39	0,0180
40	47,07	0,0270

Индекс поврежденности демонстрирует стабильное увеличение с ростом длины трещины. Данный параметр позволяет классифицировать дефекты по размеру. Точность локации дефекта по параметру dA в данном эксперименте является средней, что объясняется расположением дефекта по направлению осей X и Y.

Разработанная конечно-элементная модель позволяет изучать процессы распространения волн Лэмба в алюминиевой пластине. При взаимодействии волн Лэмба с трещиной наблюдается падение амплитуды сигнала, рисунок 1, что позволяет установить не только наличие дефекта, но и его расположение.

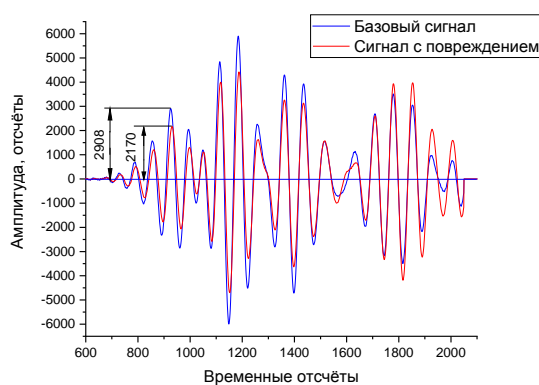


Рисунок 1 – Форма сигнала пары 12-5 на частоте 50кГц в одной системе координат

При увеличении длины трещины есть тенденция смещения расчётных координат повреждения в правый верхний угол и уменьшения разброса промежуточных координат, рисунок 2. При этом точность обнаружения дефекта является средней и с увеличением длины трещины не изменяется.

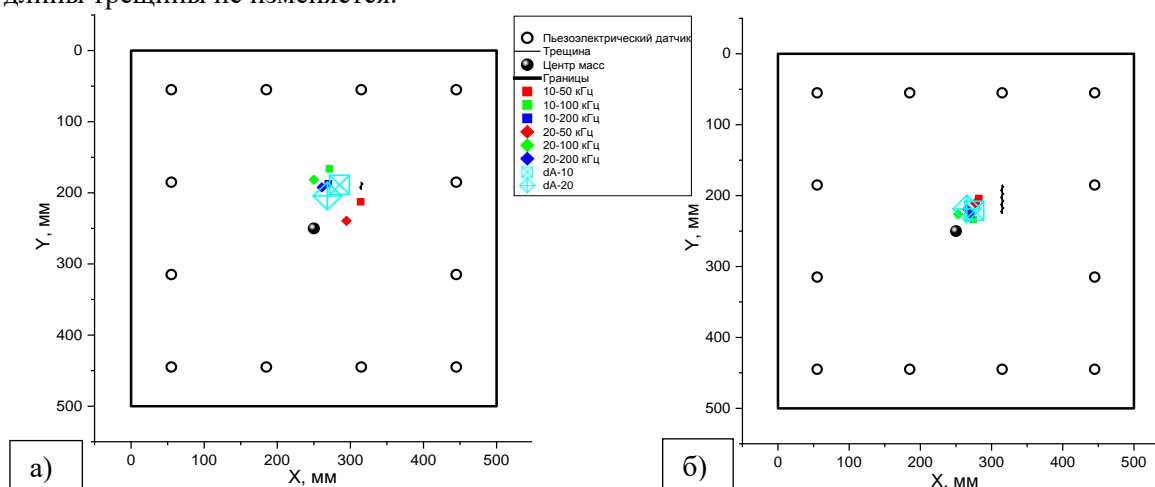


Рисунок 2 – Результаты обнаружения трещины длиной: а) 10 мм; б) 40 мм

Данная конечно-элементная модель позволяет упростить исследование возможности обнаружения трещин для разработки системы встроенного ультразвукового контроля.

#### **Список литературы**

1. Achenbach, J. D. Structural Health Monitoring – What is the prescription // Mechanics Research Communications – 2009. – Vol. 36, No. 2. P.137-142.
2. Alleyne D. N., Cawley P. The interaction of Lamb waves with defects // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 1992. – Vol. 39, No. 3. P. 381-397.
3. Lu Y. Damage detection using piezoelectric transducers and the Lamb wave approach. Part I, II. Robust and quantitative decision making / Lu Y., Wang X., Tang J. // Smart materials and structures. – 2008. – Vol. 17, No. 2. P. 25-34.

### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРАДИЕНТНОЙ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЙ И СТРУКТУРНЫЙ ОТКЛИК СПЛАВА Fe-Ni ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ**

*А.В. КОРЧУГАНОВ, Д.С. КРЫЖЕВИЧ, Ю.А. ЧУМАКОВ, А.С. ГРИГОРЬЕВ*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [avkor@ispms.ru](mailto:avkor@ispms.ru)

Разработка новых гетерогенных и иерархических структур, сочетающих высокую прочность и пластичность, является одним из наиболее перспективных направлений в материаловедении [1–2]. Среди большого разнообразия гетерогенных структур следует выделить материалы с градиентной зеренной структурой, уникальность физико-механических свойств которых привлекает пристальное внимание исследователей во всем мире. В таких материалах в одном из направлений монотонно меняется размер зерен. Как правило, уменьшение размера зерна происходит по направлению к свободной поверхности исследуемых образцов. Подобное упорядочение зерен по размерам приводит к формированию в материале областей с существенно разными механическими характеристиками, комбинация которых значительно повышает эксплуатационные свойства материалов с градиентной зеренной структурой. Причины одновременного достижения высокой прочности и пластичности в градиентных материалах связаны со следующими процессами. Первоначально пластическая деформация зарождается в крупных зернах и по мере увеличения механической нагрузки она постепенно распространяется в области с меньшим размером зерен. В результате этого оптимизируется перераспределение напряжения между зернами разных размеров, обладающих разной прочностью, в теле образца, что ведет к подавлению локализации деформации [3]. При повышении нагружения процесс делокализации деформации постепенно распространяется на зерна более мелких размеров, пока не достигнет самого малого размера нанозерен [4]. При этом большие деформированные зерна упрочняются за счет накопления дислокаций, обеспечивая общее деформационное упрочнение образца [5]. В это время малые зерна разупрочняются миграцией границ зерен и укрупнением [6]. Таким образом, в градиентной зеренной структуре одновременно активируются различные механизмы пластической деформации для существенно разных элементов структуры. Это позволяет наноструктурированному поверхностному слою градиентного материала, сохраняя высокие прочностные характеристики всего образца, деформироваться вместе с другими частями образца на существенно большую величину, чем однородный нанокристаллический аналог.

Не смотря на общее понимание протекания процессов прочности и пластичности, одновременное влияние различных атомных механизмов на отклик градиентных материалов при механическом нагружении во многом не ясны и требуют детального изучения. В настоящей работе проведено изучение влияния формы зерен, текстуры и